第40卷 第8期
2023年8月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 40 No. 8
Aug. 2023

官厅和密云水库水域面积变化及影响因素比较研究

马振刚[1,2]， 李黎黎[1,2]， 张俊贵[1]

（1. 张家口学院旅游与环境学院，河北 张家口 075000；2. 张家口市生态监测与综合治理技术创新中心，河北 张家口 075000）

摘 要：以首都水源涵养功能区内的官厅水库和密云水库为研究对象，评估了两个水库1980年以来的水域面积变化，分析了降水量、植被覆盖度和人为用水量三项因素的影响。利用1980—2022年长时序遥感影像提取了水库水域面积，计算了植被覆盖度，使用Pearson相关分析探讨了影响因素相关关系。研究表明：(1) 自2013年以来，两个水库水域面积均持续增加至历史高位，表明水源涵养成效显著。(2) 近40 a来，两个水库的水域面积变化过程同步性明显，均表现为上升期-高位保持期-下降期-地物维持期-恢复期5个阶段。(3) 水库上游张家口段流域年降水量与水库面积之间没有表现出相关性；与解译影像同期的6—7月降水量与水库面积之间也没有表现出相关性。(4) 官厅水库上游张家口段的植被覆盖度整体呈现上升态势，2000年是一个变异点。密云水库上游张家口段的植被覆盖度持续稳定在0.7水平上。相关分析表明，植被覆盖度与水库水域面积之间没有相关性。(5) 永定河流域张家口段人为用水量从2000年来整体上逐年减少$0.2×10^8$ m^3，与官厅水库水域面积呈显著负相关，有效增加了水库入库水量。(6) 2019年以来流域水库集中输水和引黄补水，对官厅水库水域面积和沿河地区生态补水影响较大，建议对张家口水源涵养成效从地表径流入库量、地下水回升量、生态补水量等方面进行综合评估。

关键词：水域面积；水源涵养；评价；因素分析；官厅水库；密云水库

对空间进行区划和建设，以强化其某些功能，是空间治理之道。其间包含着复杂的人地作用关系，厘清人与地的作用方向、强度和机理，是一个永恒的话题[1-2]。水源涵养功能区建设是以涵养水源为主要目标的人地作用功能区域[3]，张家口因被定位为首都水源涵养功能区而具有一定的代表性。2017年1月习近平总书记视察张家口时作出重要指示："要加强生态建设，树立生态优先意识，建成首都水源涵养功能区和生态环境支撑区，探索一条经济欠发达地区生态兴市、生态强市的路子"。2019年国家发改委和河北省政府正式发布了《张家口首都水源涵养功能区和生态环境支撑区建设规划(2019—2035年)》。"张家口首都水源涵养功能区"以张家口地区为水源涵养主体区域，以首都和张家口本地为受益区域，其中维护首都北京水安全是重点。因为官厅水库、密云水库是首都北京的两个重要水源地，其上游区域绝大部分在张家口，所以本文选择这两个水库作为张家口为首都涵养水源成效的主要观测点。

水源涵养是生态系统服务功能之一，是水与植被、土壤等相互作用所产生的综合效益，其作用机制和过程是复杂的，受空间(不同区域、不同尺度)、时间(短时间、长时间)、受益者(本地或外地)等多因素影响。有关水源涵养的研究很多，涵盖了影响因素分析、评估方法、功能评价、机理分析、生态补偿等环节和领域。其中以北京和张家口为研究区的水源涵养方面的研究也较多，在水量和水质方面，梁涛等[4]分析了官厅水库1972—1996年间的水质演变时序特征；李亚楠[5]分析了密云水库的水质状况；马振刚等[6]分析了1978—2013年官厅水库面积的时空变化。在气候对涵养水源影响方面，2000年李丽娟等[7]对密云水库上游潮白河近百年来的径流演变规律及其驱动因子作了分析，认为河川径流总体呈指数减少趋势，人类活动已成为河川径流演化的主要驱动因子；夏军等[8]讨论分析了气候变化对密云水库水资源的影响，认为在其研究的时空尺度

收稿日期：2022-11-03； **修订日期：**2023-06-08
基金项目：国家社会科学基金项目(17BTY005)；河北省高教教改项目(2022GJJG588)；张家口市社科联课题(2023010)
作者简介：马振刚(1980-)，男，副教授，主要从事自然地理方面的教学与研究工作. E-mail: zgma8888@sina.com

内，潮白河流域气候变化对入库径流的影响贡献率潮河为25%，白河为45%。在地表覆被对水源涵养影响方面，2005年高成德等[9]以水源涵养和防止土壤侵蚀两个方面为共同目标，认为密云水库集水区当时的最佳森林覆盖率以62%为宜；孙庆艳等[10]对密云水库集水区内的不同树种的截留能力进行了研究，证明对降水的截留能力受降水量大小、树种、长势等多种因素影响；罗广田[11]对密云水库上游典型林分水源涵养能力进行了分析，表明不同林分在枯落物层、土壤含水层等方面的涵水能力均有差异。水源涵养生态效益方面，廖浪涛、齐娜等[12-13]分别就密云水库水源涵养林的生态效益、生态服务指标体系构建等方面进行了研究。综上所述，在水源涵养影响因素方面，普遍认可降水、植被覆盖度、人为耗水等是主要因素，但各因素影响强弱会因时因地而异。重视水源涵养的生态服务价值，但生态价值评估和实现路径还不统一。特别是以官厅水库、密云水库为对象，开展水源涵养比较研究的还鲜见报道。考虑到官厅水库和密云水库同样承担水源涵养的功能，且所属地理空间临近，自然环境相似，所属行政区域有重叠，以二者为研究对象进行水源涵养方面的比较研究，可深化认知二者之间的异同，为首都水源涵养功能区建设提供针对性建议。

张家口建设首都水源涵养功能区的主要成效直接表现就是官厅水库、密云水库水域面积的增减。主要举措是开源节流，开源关键体现在区域降水量的变化以及植被覆盖度影响下的产水能力情况，节流关键是人们生产生活用水情况。本文以官厅水库、密云水库的水域面积变化作为衡量水源涵养成效的指标，以降水量、植被覆盖度、用水量三个因素作为主要影响因子，分析了40 a来水域面积变化和影响因素的作用关系。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

研究区位于密云水库、官厅水库的上游流域张家口地区（图1）。密云水库是首都北京最大的地表饮用水源地，其上游潮白河流域是密云水库的重要集水区，地跨北京市、承德市和张家口市的部分区县。该区域属于中温带向暖温带过渡、半干旱向半湿润过渡的大陆性季风气候，多年平均气温9～10 ℃，多年平均降水量约479 mm，降雨绝大多数集中在夏季，所形成的地表径流是河流的主要补给形式[14]。流域内植被以天然次生林和人工林为主。官厅水库是北京最重要的备用水源地之一，其上游水系洋河、桑干河属于永定河流域，在怀来县牛官屯交汇后入官厅水库。官厅水库流域属大陆性季风气候，由于军都山和太行山阻挡湿润的东南气流进入，流域内干燥寒冷、多风少雨，多年平均降水量405 mm，年际分配中经常出现连续枯水年现象[6]。

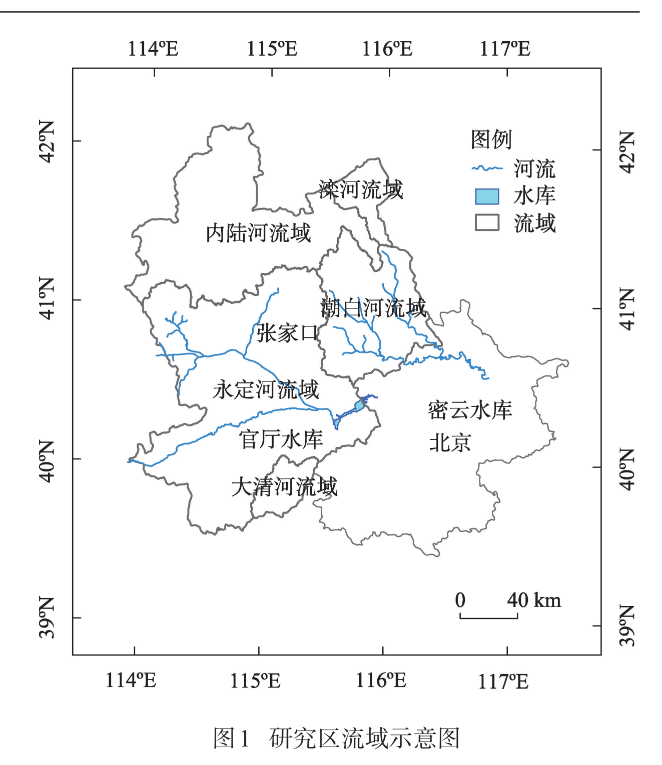


图1 研究区流域示意图

Fig. 1 Schematic diagram of watershed in the study area

1.2 数据与方法

考虑到数据的可获取性和更好地实现动态监测的目的，本文采用了Landsat卫星1980—2021年期间的42期逐年遥感影像（表1）。数据主要来源于USGS网站和“地理空间数据云”网站。为尽量减少季节性对水库水域面积的影响，影像选取时段主要集中在6—7月的雨季，且均为包含两个水库的同一景影像，以最大程度地减少因时间不统一而造成的误差。降水量数据为水库上游张家口段对应区县的逐年降水量。植被覆盖度由遥感影像解译获得，自1980年以来每两年一期。用水量数据（农业用水量、工业用水量和生活用水量）来源于张家口水资源公报。水库水域面积提取方法为ArcGIS软件屏幕矢量化。植被覆盖度采用像元二分模型计算，公式为：

$$FVC = (NDVI - NDVI_{soil})/(NDVI_{veg} - NDVI_{soil})$$

式中：FVC代表植被覆盖度；NDVI代表某一像元的

表1 影像数据基本情况

Tab. 1 The basic situation of image data

序号	影像轨道号	成像时间/年-月-日	数据类型	空间分辨率/m	内含研究目标
1	133032	1980-07-26	MSS	60	官厅、密云
2	133032	1981-06-24	MSS	60	官厅、密云
3	133032	1982-07-07	MSS	60	官厅、密云
4	133032	1983-07-05	MSS	60	官厅、密云
5	123032	1984-06-29	TM	30	官厅、密云
6	123032	1985-08-19	TM	30	官厅、密云
7	123032	1986-06-03	TM	30	官厅、密云
8	123032	1987-07-08	TM	30	官厅、密云
9	123032	1988-07-26	TM	30	官厅、密云
10	123032	1989-06-27	TM	30	官厅、密云
11	123032	1990-07-16	TM	30	官厅、密云
12	123032	1991-06-17	TM	30	官厅、密云
13	123032	1992-06-19	TM	30	官厅、密云
14	123032	1993-06-22	TM	30	官厅、密云
15	123032	1994-09-13	TM	30	官厅、密云
16	123032	1995-07-30	TM	30	官厅、密云
17	123032	1996-06-30	TM	30	官厅、密云
18	123032	1997-08-04	TM	30	官厅、密云
19	123032	1998-07-22	TM	30	官厅、密云
20	123032	1999-07-25	TM	30	官厅、密云
21	123032	2000-06-09	TM	30	官厅、密云
22	123032	2001-07-14	TM	30	官厅、密云
23	123032	2002-07-17	TM	30	官厅、密云
24	123032	2003-07-04	TM	30	官厅、密云
25	123032	2004-07-06	TM	30	官厅、密云
26	123032	2005-07-25	TM	30	官厅、密云
27	123032	2006-07-12	TM	30	官厅、密云
28	123032	2007-05-28	TM	30	官厅、密云
29	123032	2008-08-02	TM	30	官厅、密云
30	123032	2009-07-20	TM	30	官厅、密云
31	123032	2010-07-23	TM	30	官厅、密云
32	123032	2011-07-26	TM	30	官厅、密云
33	123032	2012-06-02	ETM	30	官厅、密云
34	123032	2013-07-31	OLI_TIRS	30	官厅、密云
35	123032	2014-07-18	OLI_TIRS	30	官厅、密云
36	123032	2015-07-05	OLI_TIRS	30	官厅、密云
37	123032	2016-06-21	OLI_TIRS	30	官厅、密云
38	123032	2017-07-10	OLI_TIRS	30	官厅、密云
39	123032	2018-06-27	OLI_TIRS	30	官厅、密云
40	123032	2019-06-14	OLI_TIRS	30	官厅、密云
41	123032	2020-06-16	OLI_TIRS	30	官厅、密云
42	123032	2021-06-19	OLI_TIRS	30	官厅、密云
43	123032	2022-07-24	OLI_TIRS	30	官厅、密云

归一化植被指数；$NDVI_{soil}$代表裸土覆盖的归一化植被指数；$NDVI_{veg}$代表纯绿色植被的归一化植被指数。

2 官厅水库、密云水库水域变化分析

2.1 官厅水库面积变化特征

基于Landsat陆地卫星影像，对1980—2021年官厅水库水域面积进行了提取。结果表明(图2)：40 a以来，水库面积最大值为1998年的97.2 km²，最小值为2009年的34.7 km²，多年平均面积为72.1 km²，最大变化幅度为62.5 km²，变异系数为29%。整体上的变化呈现五个阶段，1981—1991年为水域面积逐步上升期，1991—2000年为水域面积高位保持期，2000—2004年为水域面积快速下降期，2004—2013年为水域面积低位维持期(图3)，2013—2021年为水域面积恢复期(图4)。王梦琦等[15]利用GF-1数据对官厅水库2014—2019年的面积变化进行了研究，其结果与本文该时段的研究结果基本一致。

2.2 密云水库面积变化特征

基于Landsat陆地卫星影像，对1980—2021年密云水库水域面积进行了提取。由图5可知，40 a以来，水库面积最大值为1994年的160.4 km²，最小值为1982年的52 km²，多年平均面积为104.5 km²，最大变化幅度为108.4 km²，变异系数为33%。整体上的变化呈现五个阶段，1981—1991年为水域面积逐步上升期，1991—1999年为水域面积高位保持期，1999—2003年为水域面积快速下降期，2003—2015年为水域面积低位维持期(图6)，2015—2021年为水域面积恢复期(图7)。该结果与曹荣龙、李子君等的相关研究结论基本一致[16-17]。

2.3 官厅水库、密云水库水域面积变化同步性分析

综上所述，官厅水库和密云水库水域面积变化过程的同步性还是比较明显的。近40 a来，变化过程均表现为上升期-高位保持期-下降期-低位维持期-恢复期五个阶段，且每个阶段时间范围基本一致(表2)。

通过绘制官厅、密云水库之间的面积散点图，可以发现二者之间具有一定的相关性(图8)。散点数据线性拟合公式为：官厅水库面积=24.073+0.460×密云水库水域面积。Pearson相关分析表明，官厅水库面积和密云水库水域面积之间的相关系数值为0.743，且呈现出0.01水平的显著性，说明二者之间存在显著的正相关关系。

3 水域面积变化影响因素分析

水源涵养量受相关因素影响，有关研究显示降水量、植被覆盖度和人类活动是主要考虑因素[18-19]。虽然官厅水库、密云水库自然地理位置处在400 mm降水线两侧，行政位置处在北京和张家口这两个不同发展阶段的地区，但近40 a来两水库水域面积变化具有良好的同步性，有必要就影响因素进行深入分析。

3.1 降水量变化

3.1.1 永定河流域张家口段降水情况 永定河上游张家口地区主要包括主城区、怀来县、涿鹿县、宣化区、万全区、崇礼区、阳原县、怀安县、蔚县。根据以上县区1980—2022年的逐年降水数据，核算出永定河流域张家口段的逐年降水量(图9)。结果显示，43 a来该区域年均降水量为394 mm，最大年降水量出现在1995年为557 mm，最小降水量出现在1999年为278 mm，变异系数为16%。高于75分位数440 mm降水量的年份有1987年、1990年、1992年、1995年、2003年、2004年、2010年、2013年、2015年、2016年、2020年。Pearson相关分析结果表明：官厅水库

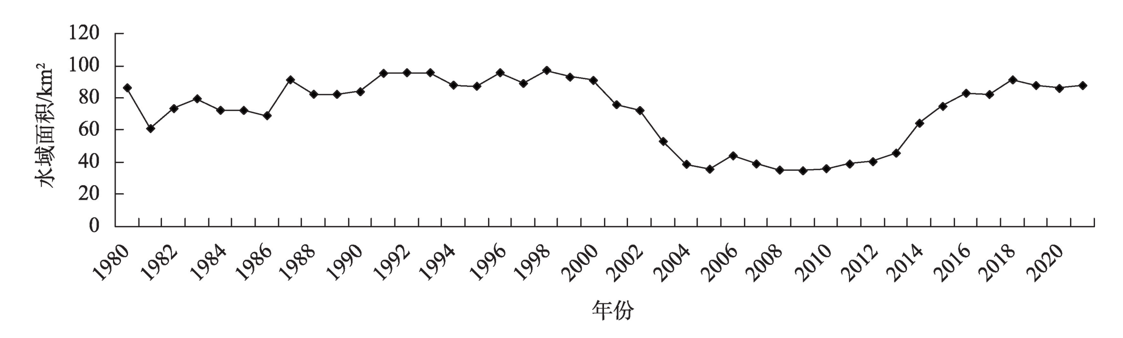


图2 1980—2021年官厅水库逐年水域面积变化特征

Fig. 2 Variation characteristics of water area of Guanting reservoir from 1980 to 2021

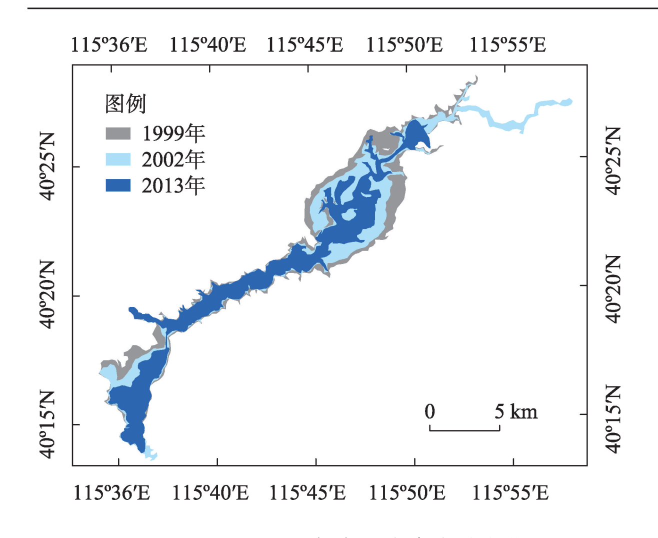


图3 1999—2013年官厅水库水域变化

Fig. 3 Area change of Guanting reservoir from 1999 to 2013

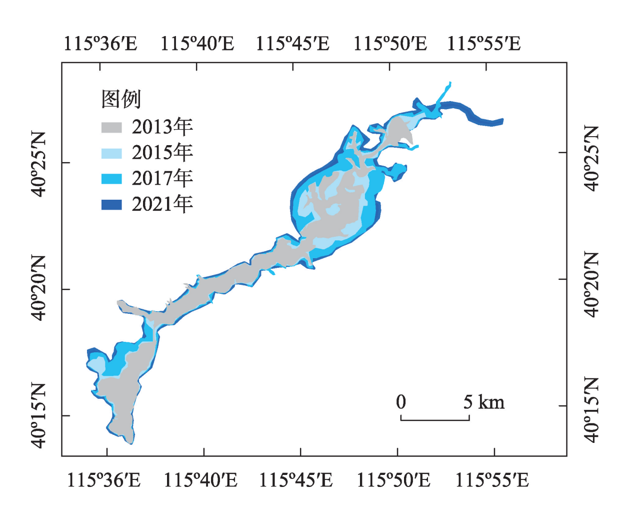


图4 2013—2021年官厅水库水域变化

Fig. 4 Area change of Guanting reservoir from 2013 to 2021

面积和永定河流域张家口段逐年降水量之间的相关系数值为0.036,接近于0,说明二者之间没有表现出相关关系。

考虑到解译影像均为6月和7月的数据,且官厅水库位于怀来县内。为使分析数据的时空尺度与解译影像更一致,利用Pearson相关分析研究了官厅水库面积和怀来县逐年6月、7月降水量之间的相关关系,结果表明:二者之间的相关系数值为0.114,也没有表现出相关关系。王霞[20]研究发现,官厅水库流域的降水有着周期性的变化,即丰水年和枯水年及枯水年组交替变化,降水量在各个周期的总量及其分布基本保持一致。对于相对较稳定的降水量而言,官厅水库的实测径流量的分配极不稳定,随着年代的增加,急剧减少。这一结论与本文数据分析结果相吻合。

3.1.2 潮白河流域张家口段降水情况 密云水库上游潮白河流域张家口段主要位于赤城县。潮白河流域补给来源以降水为主,相关研究表明,年径流的年际波动性与降水量的年际波动性趋势基本一致[17]。选取赤城县1980—2022年的逐年降水数据进行分析(图9)。结果显示:43 a以来该区域年均降水量为424 mm,最大年降水量为2020年的640 mm,最小降水量为1997年的260 mm,变异系数为20%。高于75分位数496 mm的年份有1986年、1987年、1990年、1991年、1992年、1995年、2008年、2010年、2016年、2020年、2021年。Pearson相关分析结果表明:密云水库水域面积和年降水量之间的相关系数值为0.137,二者之间并没有表现出相关关系。考虑解译影像均为6月和7月数据,且密云水库位于密云县,为使分析数据的时空尺度与解译影像更一致,利用Pearson相关分析研究了密云水库面积和密云县逐年6月、7月降水量之间的相关关系,结果表明:二者之间的相关系数值为0.197,也没有体现出相关性。

3.2 植被覆盖度变化

地表植被能够影响集水区的水量平衡以及径流量的时空分布[21],不同的集水区对植被变化的响

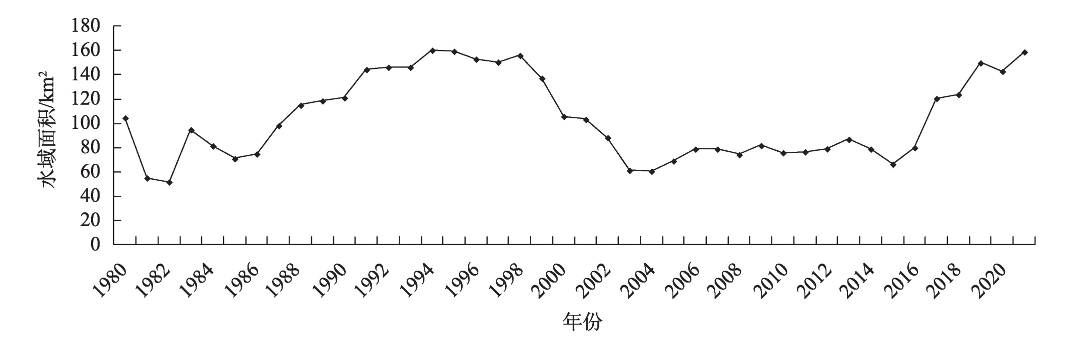


图5 1980—2021年密云水库水域面积变化特征

Fig. 5 Variation characteristics of water area of Miyun reservoir from 1980 to 2021

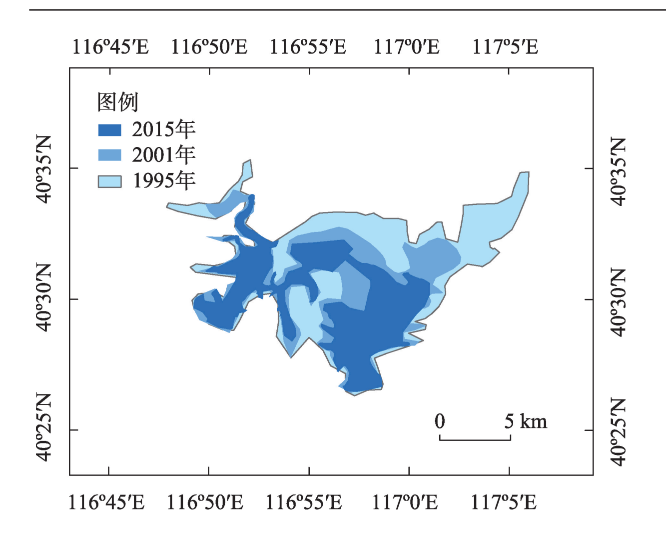


图6 1995—2015年密云水库水域变化

Fig. 6 Area change of Miyun reservoir from 1995 to 2015

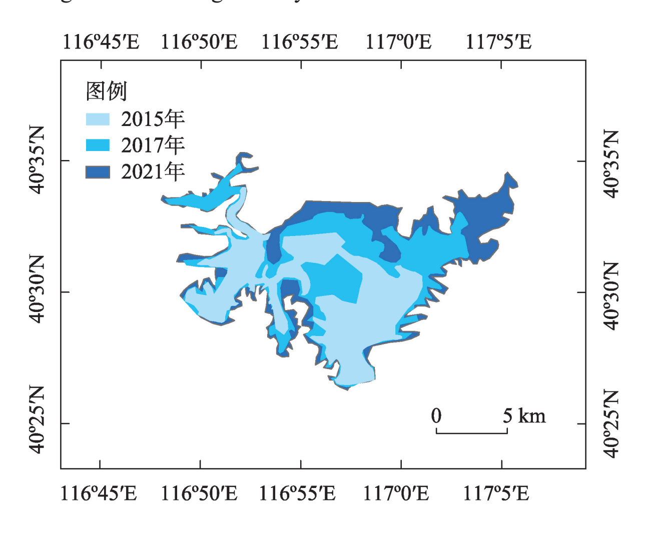


图7 2015—2021年密云水库水域变化

Fig. 7 Area change of Miyun reservoir from 2015 to 2021

应是多种形式的[22]。有学者基于时间序列NDVI对黄河流域水源涵养量进行了估算,认为在不同生态系统类型间水源涵养和NDVI具有一定的分层异质性,对草地和林地生态系统较为适合[23]。李晓琳等[24]研究表明,永定河流域1983年前径流量均随着降雨增加而增加,1983年后相同降雨情况下径流量明显减少,降雨径流相关系数明显降低。理论上,降雨作为径流形成的主要来源,与径流的变化之间存在一定的相关关系,但从长时间尺度来看降雨减少不是永定河径流减少的主要原因。下面从影响径流产生的植被覆盖度方面进行分析,以进一步明确植被覆盖度与水库水域面积变化之间的关系。

3.2.1 永定河流域张家口段植被覆盖度变化 为探讨植被覆盖度与水源涵养之间的关系,利用1984—2022年间隔年Landsat卫星影像,计算出NDVI值,并核算出流域植被覆盖度(图10)。结果表明:40 a以来,永定河流域张家口段多年平均植被覆盖度为0.519,最小值为1984年的0.283,最大值为2020年的0.655,变异系数为17%。从变化过程来看,1984—1998年植被覆盖度整体上稳步提高,2000年下降后又持续提高到现在。2000年是一个变异点,可能与降水量有关。永定河1998年降水量为429 mm,1999年降水量下降到278 mm,1999—2022年的年均降水量为315 mm,比正常值低近100 mm,这应该是导致植被覆盖度降低的原因。Pearson相关分析结果也表明,永定河流域植被覆盖度和降水量之间的相关系数值为0.611,在0.01水平上呈现出显著正相关关系。官厅水库面积和永定河流域植被覆盖度之间的相关系数值为0.102,二者之间没有表现出相关关系。

3.2.2 潮白河流域张家口段植被覆盖度变化 对1984—2022年密云水库上游张家口段植被覆盖度进行了隔年提取(图10)。结果表明:40 a来,潮白河流域张家口段多年平均植被覆盖度为0.733,最小值为2000年的0.620,最大值为2022年的0.787,变异系数为5%,整体上植被覆盖度稳定在较高水平。Pearson相关分析结果表明:密云水库面积和潮白河流域张家口段植被覆盖度之间的相关系数值为0.257,二者之间没有表现出相关关系。

表2 官厅水库和密云水库水域面积变化

Tab. 2 Comparison of area changes between Guanting reservoir and Miyun reservoir /km²

变化阶段	官厅水库			密云水库		
	时段	面积变化范围	最大变化幅度	时段	面积变化范围	最大变化幅度
第一阶段水面上升期	1981—1991年	61.0~95.4	34.4	1981—1991年	52.0~144.5	92.5
第二阶段水面高位期	1991—2000年	87.3~95.8	8.5	1991—1999年	137.4~160.4	23
第三阶段水面下降期	2000—2004年	38.8~91.0	52.2	1999—2003年	61.6~137.4	75.8
第四阶段水面低位期	2004—2013年	34.7~45.7	11	2003—2015年	60.9~87	26.1
第五阶段水面恢复期	2013—2020年	45.7~91.3	45.6	2015—2020年	66.7~159	92.3

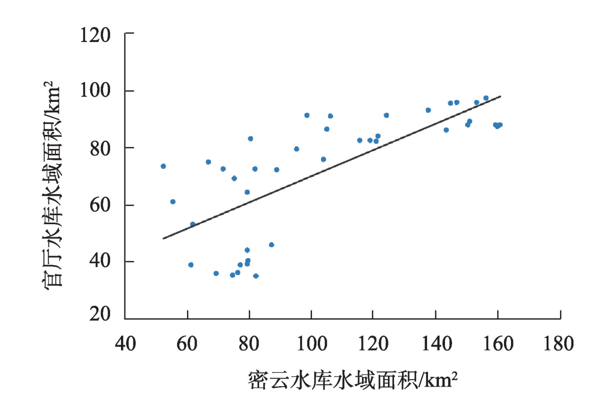


图8　官厅水库和密云水库水域面积散点图

Fig. 8　Scatter map of water area of Guanting reservoir and Miyun reservoir

3.3　流域内耗水情况分析

流域内人类生产生活用水是水资源消耗的主要方面,并影响最终可汇入到水库的水量。受数据限制,本文仅就2001年来张家口水资源公报中的用水量进行统计分析:

(1) 21世纪以来,永定河流域张家口段年用水量是逐年持续减少的(图11)。从2001年的年均用水量为8.5×10^8 m^3,下降到2017年的7.09×10^8 m^3,减少用水近1.5×10^8 m^3。该时段对应着官厅水库水域面积变化的低水平维持期和2013年以来的恢复期。利用Pearson相关分析,研究官厅水库水域面积与其上游用水量之间的相关关系,结果表明:二者相关系数值为−0.652,呈现出0.05水平的显著性,说明官厅水库面积和永定河总用水量之间有着显著的负相关关系。也就是说,虽然在2001—2013年官厅水库水域面积没有增加,但流域内用水量的减少,一定程度上减缓了水库面积衰减的程度,保障了水库的基本需求。

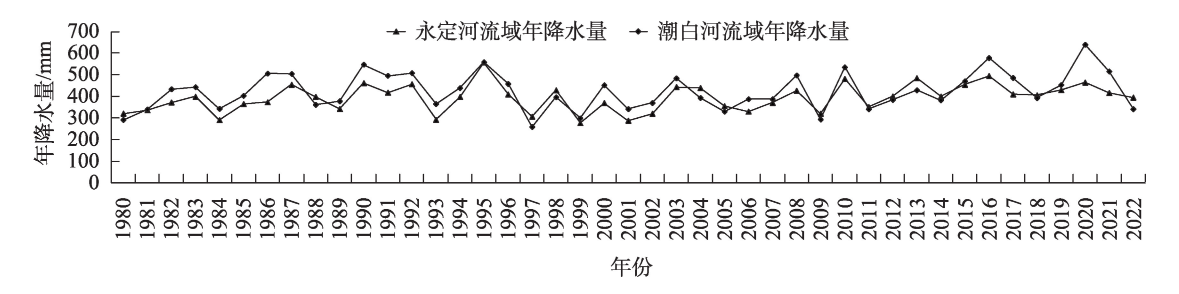


图9　永定河、潮白河流域张家口段年降水量变化

Fig. 9　Change of annual precipitation in Zhangjiakou section of Yongding River Basin and Caobai River Basin

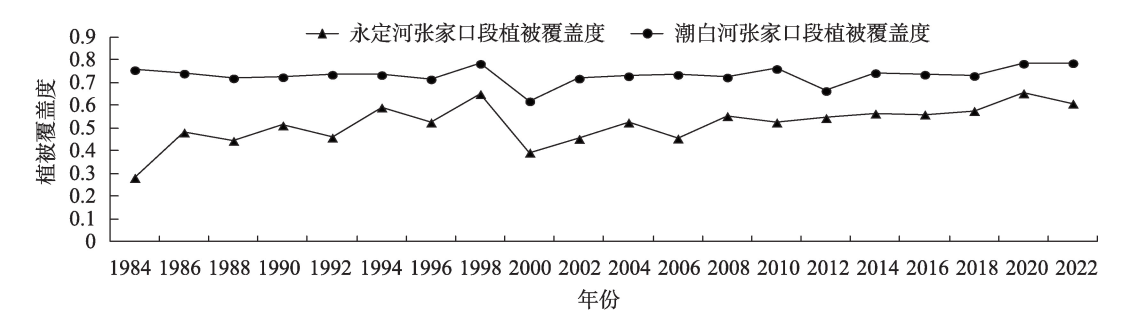


图10　永定河、潮白河流域张家口段植被覆盖度变化

Fig. 10　Change of vegetation coverage in Zhangjiakou section of Yongding River Basin and Caobai River Basin

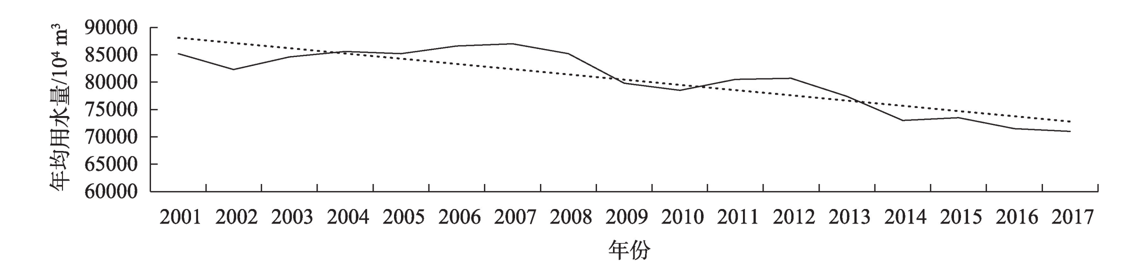


图11　2001—2017年永定河流域张家口段年均用水量

Fig. 11　Annual water consumption of Yongding River Basin of Zhangjiakou from 2001 to 2017

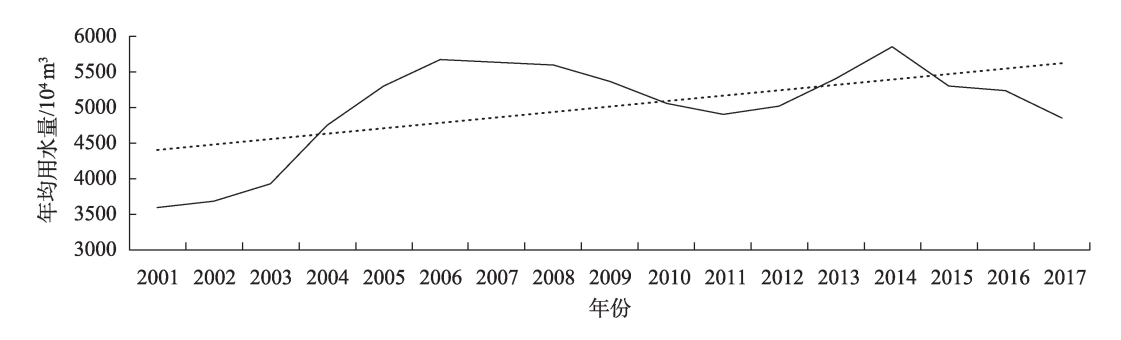


图12 2001—2017年潮白河流域张家口段年均用水量

Fig. 12 Annual water consumption of Chaobai River Basin of Zhangjiakou from 2001 to 2017

（2）21世纪以来，潮白河流域张家口段年用水量整体上围绕 $0.5\times10^8\ m^3$ 的年平均值上下波动（图12），极差为 $0.2\times10^8\ m^3$，变异系数为15%。该时段主要对应着密云水库水域面积变化的低水平维持期。Pearson相关分析显示二者不呈现相关性，主要原因是潮白河流域张家口段用水量少，仅为永定河流域张家口段用水量的6%，用水量的绝对值少决定了其对密云水库水域面积变化影响非常有限。

4 讨 论

本文对比分析了官厅水库、密云水库40 a来的水源涵养成效和影响因素的作用关系，加深了对张家口建设首都水源涵养区的认识。但受现有条件限制，还有很多需要深化探讨的地方。

（1）关于水源涵养成效的评价。目前对于水源涵养的概念还不十分统一，如有学者认为水源涵养主要指生态系统保持水分的能力，相当于“绿水”。本文主要基于“张家口建设首都水源涵养区”的功能定位，将水源涵养成效评价确定为向北京输送的水量。理论上这部分水量也会包括大气输水、地下输水和地表径流三种方式，本文没有过多地基于水循环过程进行分析，而是偏重于目标导向，直接用官厅水库和密云水库的水域面积变化进行衡量。这一衡量结果，是基于雨季期的一期遥感影像得到的。虽然在选取遥感影像时，也会对前后月份的影像进行目视比对以避免异常情况出现，但没有进行全样本的数据分析统计，所以结果的充分性还有待完善。

（2）关于水源涵养的影响因素。水源涵养因时因地不同，其内在机理复杂，影响因素多样，特别是要清晰地剥离开自然因素和人为因素的影响程度还有困难。本文采用比较研究的思路，对比分析了官厅水库和密云水库的水域面积变化和降水量、用水量和植被覆盖度三个影响因素，出发点是两个水库均隶属于京张地区且空间临近，政策驱动方向均为以涵养水源为主，产业选择上均倾向于节水型，自然气候变化有较强的关联性，落脚点是希望通过比较40 a来的水域面积情况来比较影响因素的作用情况。从分析结果来看，两个水库水域面积变化的同步性还是比较明显的，这说明一系列作用力形成的合力作用方向是一致的。以2013年以来为例，不管是自然和人为哪种因素影响更多，但水量得到增加的结果是相同的。但自然降水、植被覆盖度和人为用水量三个影响因素在不同阶段的作用大小和方向是有差异的，还需要深入分析。如2013年以来，自然降水围绕多年平均值上下波动没有大幅提高，但水库水域面积却持续增加至历史高位，说明此期间人类活动成为主导因素。所以，后续研究可在定量确定某些影响因素的基础上，分析其他因素的作用关系。

（3）水库水域面积的变化既受上游来水量影响，也与水库泄水量有关。来水既有大气降水产生的地表径流补给，也有上游水库放水补给。研究显示，官厅水库从2001年蓄水量不足 $1\times10^8\ m^3$，到2003年开展册田水库向官厅水库集中输水，再到2019年黄河水首次跨流域调入，官厅水库蓄水量逐年稳步增加[25]。由此看来，影响水库水域面积变化的因素是较多的。本文着重从张家口为首都北京涵养水源的角度来分析的，对水库放水、上游水库补水方面是缺少论证的，待后续数据支撑到位，可以进一步就这些方面进行研究。

5 结 论

2013年以来，官厅水库和密云水库水域面积持

续增加至历史高位,表明水源涵养成效显著。1980年以来,两个水库的水域面积变化过程同步性明显,均表现为上升期-高位保持期-下降期-地物维持期-恢复期五个阶段。这说明虽然两个水库分属于北京和张家口两个经济发展水平截然不同的行政区,但多因素作用的最终效果是一致的,与首都水源涵养功能区的定位和政策导向是一致的。水库水域面积与上游年降水量、植被覆盖度之间均没有表现出线性相关性,与人为用水量之间呈显著负相关,该结论对如何评价张家口建设首都水源涵养功能区的成效、如何科学对待上游植树造林对下游水库的影响具有重要意义。近几年来流域水库集中输水和引黄补水力度加大,对水库水域面积和沿河地区生态补水影响较大,可能会影响到降水、植被覆盖度与水库面积之间的作用关系,有待后续研究。建议对张家口水源涵养成效从地表径流入库量、地下水回升量、生态补水量等方面进行综合评估。

参考文献(References):

[1] 马海龙, 樊杰. 地理学中人的基本假设刍议[J]. 人文地理, 2016, 31(1): 1-7, 80. [Ma Hailong, Fan Jie. Discussion on the human hypothesis in geography[J]. Human Geography, 2016, 31(1): 1-7, 80.]

[2] 樊杰. 人地系统可持续过程、格局的前沿探索[J]. 地理学报, 2014, 69(8): 1060-1068. [Fan Jie. Frontier approach of the sustainable process and pattern of human-environment system[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(8): 1060-1068.]

[3] 吕一河, 胡健, 孙飞翔, 等. 水源涵养与水文调节: 和而不同的陆地生态系统水文服务[J]. 生态学报, 2015, 35(15): 5191-5196. [Lv Yihe, Hu Jian, Sun Feixiang, et al. Water retention and hydrological regulation: Harmony but not the same in terrestrial hydrological ecosystem services[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(15): 5191-5196.]

[4] 梁涛, 王浩, 丁士明, 等. 官厅水库近三十年的水质演变时序特征[J]. 地理科学进展, 2003, 22(1): 38-44. [Lang Tao, Wang Hao, Ding Shiming, et al. An evolution of water quality in Guanting reservoir during the past three decades[J]. Progress in Geography, 2003, 22(1): 38-44.]

[5] 李亚楠. 密云水库内湖水质状况及动态变化趋势分析[J]. 北京水务, 2020(S1): 36-40. [Li Yanan. Analysis of the water quality status and dynamic change trend of the lake in Miyun reservoir[J]. Beijing Water Affairs, 2020(S1): 36-40.]

[6] 马振刚, 李黎黎, 艾立志. 1978—2013年官厅水库面积变化的时空分析[J]. 干旱区研究, 2015, 32(3): 428-434. [Ma Zhengang, Li Lili, Ai Lizhi. Temporal and spatial analysis of the area change of Guanting reservoir from 1978 to 2013[J]. Arid Zone Research, 2015, 32(3): 428-434.]

[7] 李丽娟, 郑红星. 华北典型河流年径流演变规律及其驱动力分析——以潮白河为例[J]. 地理学报, 2000, 55(3): 309-317. [Li Lijuan, Zheng Hongxing. Characteristics and driving forces of annual runoff changes for rivers in North China: A case study in the Chaobaihe River[J]. Acta Geographica Sinica, 2000, 55(3): 309-317.]

[8] 夏军, 李璐, 严茂超, 等. 气候变化对密云水库水资源的影响及其适应性管理对策[J]. 气候变化研究进展, 2008, 4(6): 319-323. [Xia Jun, Li Lu, Yan Maochao, et al. Impacts of climate change on water resource of Miyun reservoir and adaptation managements[J]. Advances in Climate Change Research, 2008, 4(6): 319-323.]

[9] 高成德, 田晓瑞. 北京密云水库集水区水源保护林最佳森林覆盖率研究[J]. 林业实用技术, 2005(8): 3-5. [Gao Chengde, Tian Xiaorui. Study on the optimal forest coverage of water source protection forest in the Miyun reservoir catchment area of Beijing[J]. Practical Forestry Technology, 2005(8): 3-5.]

[10] 孙庆艳, 余新晓, 杨新兵, 等. 密云水库集水区防护林不同树种林冠截留研究[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(3): 73-78. [Sun Qingyan, Yu Xinxiao, Yang Xinbing, et al. Study on canopy interception of different tree species in protective forests in Miyun reservoir watershed[J]. Chinese Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 7(3): 73-78.]

[11] 罗广田. 密云水库上游典型林分水源涵养能力研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019. [Luo Guangtian. Study on the Water Conservation Capacity of Typical Forests Upstream of Miyun Reservoir [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.]

[12] 廖浪涛, 丁胜, 吴水荣. 密云水库水源涵养林生态效益的评价与补偿[J]. 林业建设, 2000(6): 19-22. [Liao Langtao, Ding Sheng, Wu Shuirong. Evaluation and compensation of ecological benefits of water source conservation forests in Miyun reservoir[J]. Forestry Construction, 2000(6): 19-22.]

[13] 齐娜. 密云水库水生态服务评价指标体系构建与应用[J]. 水利规划与设计, 2021(2): 15-18, 130. [Qi Na. Construction and application of water ecological service evaluation index system for Miyun reservoir[J]. Water Resources Planning and Design, 2021 (2): 15-18, 130.]

[14] 周连兄, 崔万晶, 赵云杰. 北京密云水库集水区降水及干旱时空分布特征[J]. 中国水土保持科学, 2020, 18(5): 35-42. [Zhou Lianxiong, Cui Wanjing, Zhao Yunjie. Temporal and spatial distribution characteristics of precipitation and drought in the Miyun reservoir catchment area of Beijing[J]. Chinese Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 18(5): 35-42.]

[15] 王梦琦, 张文, 孟令奎. 2014—2019年北京密云和官厅水库时空变化分析[J]. 测绘地理信息, 2022, 47(4): 100-104. [Wang Mengqi, Zhang Wen, Meng Lingkui. Analysis of spatiotemporal changes in Miyun and Guanting reservoirs in Beijing from 2014 to 2019[J]. Surveying and Mapping Geographic Information, 2022, 47

(4): 100-104.]

[16] 曹荣龙, 李存军, 刘良云, 等. 基于水体指数的密云水库面积提取及变化监测[J]. 测绘科学, 2008(2): 158-160. [Cao Ronglong, Li Cunjun, Liu Liangyun, et al. Extraction and change monitoring of Miyun reservoir area based on water body index[J]. Surveying and Mapping Science, 2008(2): 158-160.]

[17] 李子君, 李秀彬. 潮白河上游1961—2005年径流变化趋势及原因分析[J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(S2): 82-87. [Li Zijun, Li Xiubin. Analysis of the trend and causes of runoff changes in the upper reaches of the Chaobai River from 1961 to 2005[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2008, 30(S2): 82-87.]

[18] Wei Xingtao, Oliver Valentine Eboy, Cao Guangchao, et al. Spatio-temporal variation of water conservation and its impact factors on the southern slope of Qilian Mountains[J]. Regional Sustainability, 2023, 4(1): 54-67.

[19] Ma Pu, Lyu Shihai, Diao Zhaoyan, et al. How does the water conservation function of Hulunbuir forest-steppe ecotone respond to climate change and land use change?[J]. Forests, 2022, 13(12): 2039-2039.

[20] 王霞. 如何提高官厅水库在连续枯水年中的供水保障[J]. 北京水务, 2008, 138(1): 33-35. [Wang Xia. How to improve the water supply guarantee of Guanting reservoir in continuous dry years[J]. Beijing Water Affairs, 2008, 138(1): 33-35.]

[21] 许丽婷, 刘海红, 黄丽洁, 等. 2000—2020年汾河流域生态环境与水源涵养时空变化[J].干旱区研究, 2023, 40(2): 313-325. [Xu Liting, Liu Haihong, Huang Lijie, et al. The spatiotemporal changes of ecological environment and water conservation in the Fenhe River Basin from 2000 to 2020[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(2): 313-325.]

[22] 刘琳, 熊东红, 张宝军, 等. 拉萨河谷杨树人工林枯落物蓄积特征及持水性能[J]. 干旱区研究, 2021, 38(6): 1674-1682. [Liu Lin, Xiong Donghong, Zhang Baojun, et al. Litter accumulation characteristics and water holding capacity of poplar plantation in Lhasa valley[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(6): 1674-1682.]

[23] Wu Qiong, Song Jinxi, Sun Haotian, et al. Spatiotemporal variations of water conservation function based on EOF analysis at multi time scales under different ecosystems of Heihe River Basin[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 325 (PA): 116532-116532.

[24] 李晓琳, 潘兴瑶, 杨默远, 等. 基于生态补水的永定河流域径流变化分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2022, 58(6): 886-892. [Li Xiaolin, Pan Xingyao, Yang Moyuan, et al. Analysis of runoff changes in the Yongding River Basin based on ecological replenishment[J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science Edition), 2022, 58(6): 886-892.]

[25] 王欣, 宋倩, 段卫军, 等. 官厅水库供水调度在永定河生态补水中的作用[J]. 北京水务, 2023(1): 47-52. [Wang Xin, Song Qian, Duan Weijun, et al. The role of Guanting reservoir water supply scheduling in ecological replenishment of the Yongding River[J]. Beijing Water Affairs, 2023(1): 47-52.]

Comparative study on water area changes and influencing factors in the Guanting and Miyun reservoirs

MA Zhengang[1,2], LI Lili[1,2], ZHANG Jungui[1]

(1. College of Tourism and Environment of Zhangjiakou University, Zhangjiakou 075000, Hebei, China;
2. Zhangjiakou Ecological Monitoring and Comprehensive Management Technology Innovation Center, Zhangjiakou 075000, Hebei, China)

Abstract: This study focuses on the Guanting and Miyun reservoirs in the capital water conservation functional area to evaluate water area changes and analyze the impact of precipitation, vegetation coverage, and human water consumption since 1980. The study used long-term remote sensing images from 1980 to 2022 to extract the water area of each reservoir and calculate vegetation coverage. Pearson correlation analysis was used to explore the correlation between the three impact factors. We found that the water area of both reservoirs continuously increased, with historical highs since 2013, indicating significant water conservation achievements since the 18th National Congress of the Communist Party of China. In the past 40 years, the water area change process of the two reservoirs has significantly synchronized, with five different periods, including rising, high level maintenance, falling, ground feature maintenance, and recovery periods. There was no correlation between annual precipitation and reservoir area in the Zhangjiakou section upstream of the reservoir and also no correlation between precipitation and reservoir area in June and July during the same period. The vegetation coverage in the Zhangjiakou section upstream of the Guanting reservoir had an overall upward trend, with 2000 being a variation point. The vegetation coverage of the Zhangjiakou section upstream of the Miyun reservoir continues to stabilize at a level of 0.7. Correlation analysis shows that there is no correlation between vegetation coverage and reservoir water area. The artificial water consumption in the Zhangjiakou section of the Yongding River Basin decreased by 20 million m^3 per year since 2000, showing a significant negative correlation with the water area of the Guanting reservoir and effectively increasing the inflow volume of the reservoir since 2019. The centralized water conveyance and water diversion from the Yellow River have had a significant impact on the water area of the Guanting reservoir and on ecological water replenishment along the river. Future research is needed to comprehensively evaluate the water conservation effectiveness of Zhangjiakou in terms of surface runoff into the reservoir, groundwater recovery, and ecological water replenishment.

Keywords: water area; water conservation; evaluation; factor analysis; Guanting reservoir; Miyun reservoir